

## 수소 네트워크 구성 시 기존 파이프 라인 활용의 경제적 효과

김대현 · 정창현 · 한종훈<sup>†</sup>

서울대학교 화학생명공학부  
151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1  
(2008년 1월 3일 접수, 2008년 2월 24일 채택)

### Economic Efficiency of Using Existing Pipe Line in Hydrogen Network

Daehyeon Kim, Changhyun Jeong and Chonghun Han<sup>†</sup>

School of Chemical and Biological Engineering., Seoul National University,  
San 56-1, Shinlim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea  
(Received 3 January 2008; accepted 24 February 2008)

#### 요 약

석유화학산업단지의 수소 네트워크 최적화는 석유화학산업 단지 내 각 업체 간 잉여 수소와 필요 수소의 양과 순도를 조사하여 최적의 분배를 구하는 것이다. 본 논문에서는 새로운 네트워크를 구성할 때 기존의 파이프라인을 고려한다면 비용을 줄일 수 있는 효과를 정량적으로 명확하게 알아보기 위해 가상의 수소 네트워크를 구성하여 기존의 파이프라인을 활용하는 것과 활용하지 않는 두 가지의 case를 모델링하고 수리계획법을 사용하여 계산, 비교해 보았다. 그 결과 기존의 파이프라인을 활용한다면 가정된 조건 하에서 파이프비용을 20%이상 줄이고 전체네트워크 이익을 약 14억 원 증가시키는 결과를 얻을 수 있었다.

**Abstract** – In petrochemical complex, Hydrogen Network optimization is surveying the extra Hydrogen and needed Hydrogen of each company and calculating the optimized distribution. This paper compares the case of using the existing pipeline and the case of not using the existing pipeline to show the effect quantitatively and clearly by modeling the both cases and using mathematical programming. As a result, using the existing pipeline can save the pipe cost over 20% and increase the whole network benefit by thirteen billion won.

Key words: Hydrogen, Network, Pinch Analysis, Optimization, Pipe Line, Economic Efficiency

#### 1. 서 론

현재 석유화학산업계는 국제경쟁심화, 환경규제강화, 원유가격상승등으로 많은 문제들에 직면하고 있다. 따라서 석유화학 업체들은 기업의 경쟁력 강화를 위해 공정과 공장단위의 네트워크최적화를 넘어서 석유화학산업단지 전체네트워크의 효율적인 분배와 통합을 현재 시도하고 있고 규모의 경제를 이루기 위해 앞으로 공장 통합과 인수, 합병이 앞으로 활발히 이루어질 거라 생각한다.

특히 수소는 에너지 문제와 환경 문제를 동시에 해결할 수 있는 대안으로 대체에너지로서 큰 각광을 받고 있는 물질이다. 또한 수소의 경우 석유화학산업단지 내 석유화학업체와 정유업체간 수급불균형이 존재하여 상호간의 네트워크를 구성한다면 쉽게 양자 간 이익을 얻을 수 있어 현재 기업 간에 활발하게 협력이 이루어지고 있다.

Hallala와 Liu는 컴프레서가 포함된 정유공정을 MILP를 사용하여 수소 네트워크 모델을 만들었다[1]. 그리고 Liu와 Zhang은 이러

한 모델을 조금 더 발전시켜 정제장치를 포함하는 네트워크 모델을 제안하였다[2]. 또한 Changhyun Jeong은 네트워크 구성에 필요한 장치 비용 및 제약조건들을 추가한 수소 재활용 최적 네트워크 설계를 제안하였다[3].

하지만 그 과정에서 기존의 시설 활용을 고려하지 않고 네트워크를 구성한다면 중복투자가 발생하여 최적일 때보다 네트워크 전체의 이익이 줄어들어 손해가 아닌 손해를 볼 수 있다.

따라서 본 논문에서는 산업단지 내 수소네트워크 구축 시 기존 파이프라인의 활용했을 때 얻을 수 있는 경제적인 효과를 case 비교를 통해 계산해보려고 한다.

#### 2. 배경이론

##### 2-1. 수소핀치분석(Hydrogen Pinch analysis)

핀치분석은 원래 Linhoff가 제안한 열 교환망 합성에서 물질교환에 관한 그래프를 이용하는 방법론이었는데[4] 이를 Alves와 Towler가 수소 핀치개념으로 발전시킨 방법론을 제안하였다[5]. 이러한 핀

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: chhan@snu.ac.kr

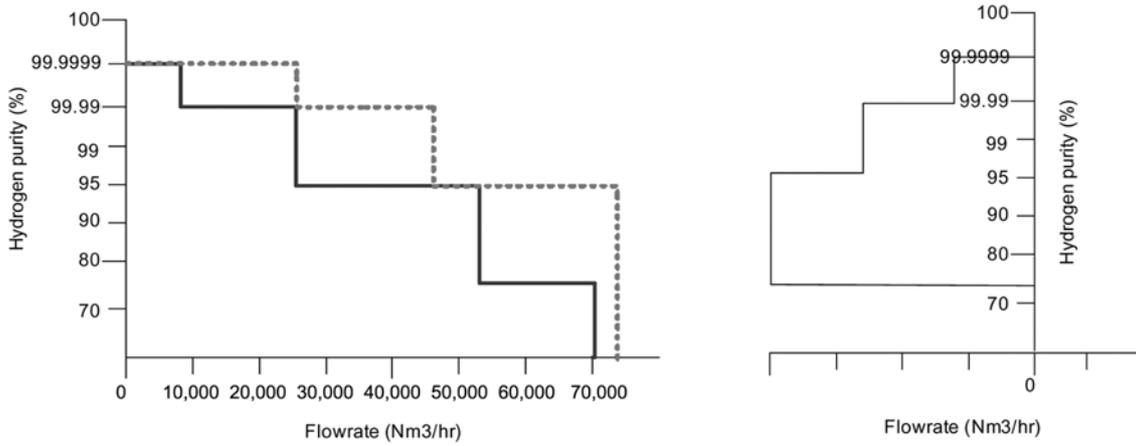


Fig. 1. Construction of a hydrogen composite curve and surplus diagram[3].

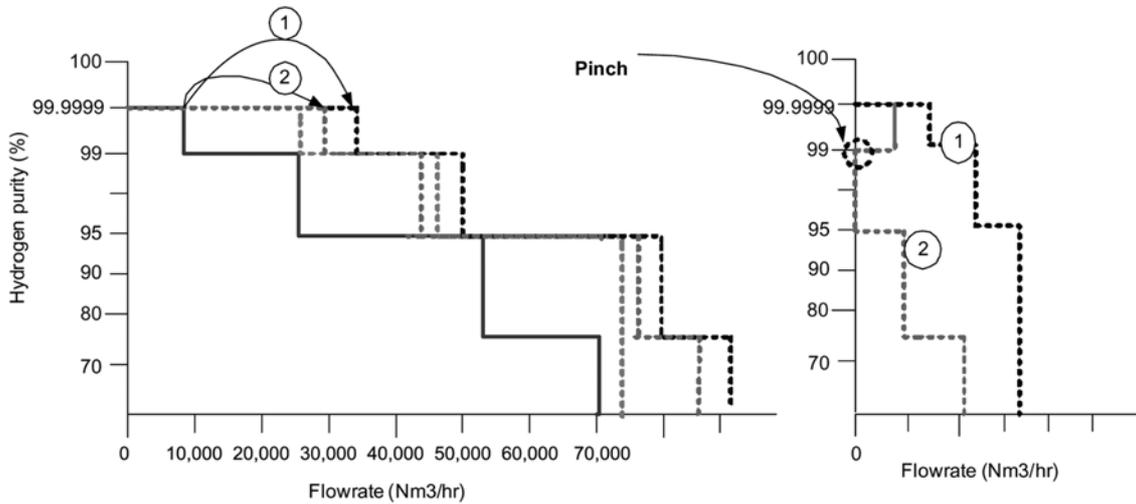


Fig. 2. Feasible hydrogen composite curve and surplus diagram[3].

치 방법을 사용하여 수소 네트워크에 적용하면 수소정제장치에서 정제를 하여 얻거나 외부에서 구입해야하는 고수소의 수소의 양을 계산할 수 있다. 우선 각 농도별 수소 잉여량과 수소 필요량을 누적 그래프로 그리면 현재 네트워크 상태가 전체적으로 수소가 부족한 상태인지 남는 상태인지를 Fig. 1과 같이 알아 낼 수 있다.

그리고 만일 현재 네트워크가 수소가 부족하다면 추가적으로 수소를 얼마만큼 공급해주어야 하는지를 나타내는 pinch point를 찾는 것도 Fig. 2와 같은 방법으로 구해낼 수 있다.

2-2. 수소 파이프라인의 비용 모델

Nathan parker는 천연가스의 파이프라인 비용의 통계적인 분석을 통해 수소파이프 라인의 비용을 다음과 같이 모델링하였다[6].

$$\begin{aligned}
 &H2 \text{ Materials (dis, length)} \\
 &= 1.5 \{ [330.5(\text{dia})^2 + 687(\text{dia}) + 26.960](\text{length}) + 35,000 \} \\
 &+ \\
 &H2 \text{ Labor (dis, length)} \\
 &= 1.25 \{ [343(\text{dia})^2 + 2,074(\text{dia}) + 170,013](\text{length}) + 185,000 \} \\
 &+ \\
 &H2 \text{ Misc (dis, length)} = 1 \{ [8,417(\text{dia}) + 7,324](\text{length}) + 95,000 \} \\
 &+
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H2 \text{ Right of Way (dis, length)} &= 0 \\
 &=
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H2 \text{ Pipeline Cost (dis, length)} \\
 &= [924.5(\text{dia})^2 + 12,040(\text{dia}) + 260,280](\text{length}) + 378,750 \\
 &\text{where (dia) is in inches, (length) is in miles, and Cost is in dollars.}
 \end{aligned}$$

Nathan parker의 논문에서는 dia, length, cost의 단위가 inch, mile, dollar로 되어 있는데 이를 각각 inch, km, won으로 환산하여 정리하면 다음과 같다. dollar와 won간 환율은 980 won/dollar로 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 C_{\text{Pipeline}}(\text{dia, length}) \\
 &= [562967.4(\text{dia})^2 + 7331669(\text{dia}) + 158495579.9](\text{length}) + 371175000
 \end{aligned}$$

dia : 파이프 직경 (inch)

length : 설치거리 (km)

즉 파이프라인의 비용은 거리와 직경의 함수로 위와 같이 나타낼 수 있다.

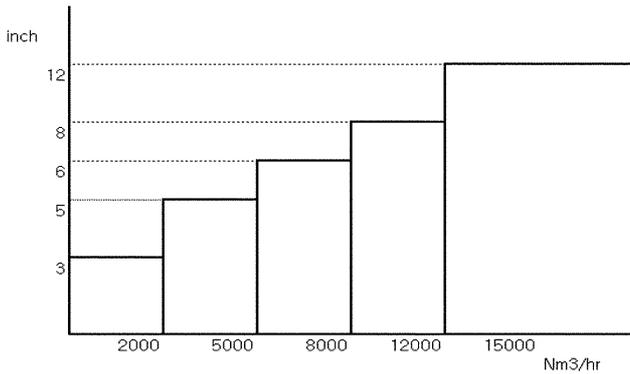


Fig. 3. Hydrogen Pipe diameter by flow rate.

2-3. 수소 파이프라인의 직경 결정

N.Hallale은 수소 파이프의 직경을 다음과 같은 식으로 결정하였다[7].

$$D^2 = \frac{4 \times F \times \rho_o}{\pi \times u \times \rho}$$

u: superficial gas velocity (usually 15-30 m/s)

본 논문에서는 위의 식을 사용하여 u를 20 m/s로 가정하고 상용화된 파이프의 표준 규격을 고려하여 Fig. 3과 같은 계단식의 그래프를 만들어 수소 파이프라인의 직경을 결정하였다.

2-4. 수소 정제장치 비용 모델(PSA Cost Model)

수소의 회수율에 영향을 미치는 주요 인자는 피드 순도(feed purity), 제품 순도(product purity), 피드 압력(feed pressure), 잔류물 압력(residue pressure), 흡착제(absorbent) 등이 있다. 이를 반영하게 정제장치 비용에 가장 중요한 영향을 미치는 인자만을 고려하면

$$C_{PSA}(\text{US\$}) = \frac{0.4330}{q} + \frac{0.2986}{Y \times Z}$$

- q: 수소의 유량
- Y: 회수율
- Z: 수소의 피드 물분율

위와 같은 식이 되고 이를 보다 더 간편하게 구하기 위해서 다음과 같은 수소 정제장치 단축 비용 모델(PSA shortcut Model)을 Towler가 제안하였다[8].

$$C_{PSA}(\text{kUS\$}) = 503.8 + 347.4 \times F_{PSA}[\text{Mscfd}]$$

이를 won, Nm3 단위로 환산하면 다음과 같다. dollar와 won간 환율은 980 won/dollar로 가정하였다.

$$C_{PSA}(\text{won}) = 493724000 + 288362.844 \times F_{PSA}[\text{Nm}^3]$$

F<sub>PSA</sub>: PSA에서 처리되는 수소의 flow rate

3. 수소네트워크

3-1. 수소네트워크 구성

문제의 구성은 다음과 같은 2가지 case의 경제성을 비교해 봄으로써 기존의 파이프라인 활용의 경제적 효과를 알아낼 수 있도록 하였다.

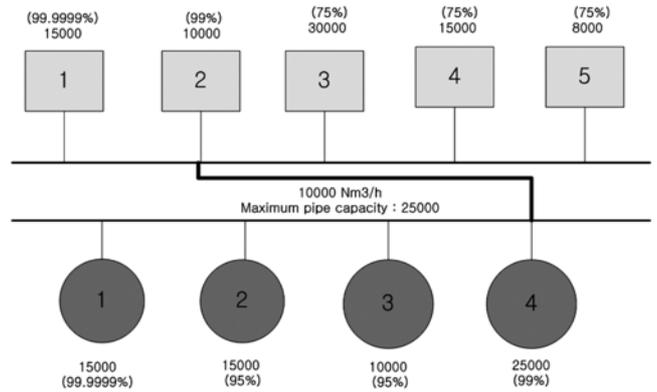


Fig. 4. Case 1 - Using existing pipeline.

3-1-1. Case 1

Case 1은 Fig. 4에서 보듯이 기존의 네트워크에 연결이 되어있는 파이프라인을 활용하는 경우이다. Fig. 4 가운데 두 개의 수평선은 석유화학산업단지 내에서 파이프를 설치할 수 있는 파이프 렉을 의미하고 사각형은 수소를 공급할 수 있는 공급원, 원은 수소를 필요로 하는 수요처를 의미하고 숫자는 각각 남겨나 필요로 하는 수소의 양이며 괄호안의 숫자는 수소의 농도를 의미한다. 그리고 공급원에서는 수소를 연료로서 사용하거나 수요처에 직접 보내주거나 정제장치인 PSA를 거쳐서 공급원에 보내줄 수 있고 수요처에서는 수소를 공급원으로부터 직접 받거나 PSA를 거쳐서 받거나 네트워크 외부에서부터 사을 수 있다. 그리고 모든 공급원과 수요처는 파이프 렉과 바로 인접하고 있다고 가정하고 있어서 공급원과 수요처 사이의 거리가 곧 두 곳을 연결해줄 파이프의 길이가 된다. Fig. 4, 5에서는 이해를 돕기 위해 파이프 렉의 위아래 쪽을 넓게 그려주었지만 실제로는 공급원과 수요처 사이에 거리에 비하면 무시할 만큼 작은 폭이므로 공급원과 수요처 사이의 거리 즉 설치해야 할 파이프라인의 길이는 세로방향의 길이는 무시하고 가로 방향 길이만 고려해주면 된다.

공급원 2와 수요처 4 사이에 연결되어 있는 파이프라인은 현재 10000 Nm³/h의 수소를 공급해주고 있고 이 파이프라인의 최대수송 용량은 수요처 4에서 필요로 하는 용량인 25000 Nm³/h까지 가능하다.

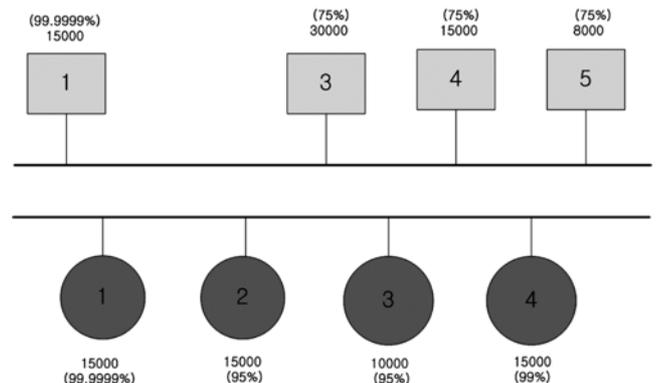


Fig. 5. Case 2 - Not using existing pipeline.

다. 따라서 15000 Nm<sup>3</sup>/h 만큼의 수소 용량의 여유가 있기 때문에 파이프 렉에 인접해있는 다른 공급원이 연결만 해주면 바로 수요처 4에 수소를 공급해 줄 수 있다.

### 3-1-2. Case 2

Case 2는 Fig. 5에서 보듯이 같이 기존의 네트워크 연결을 이용하거나 부분적으로 공유하지 않고 새로운 네트워크를 구성하는 경우이다. 따라서 공급 가능한 전량을 수요처 4로 공급하고 있었던 공급원 2는 새로운 네트워크를 구성 시 고려대상에서 제외되고 수요처 4는 공급원 2에서 공급을 받고 있는 10000 Nm<sup>3</sup>/h를 제외한 15000 Nm<sup>3</sup>/h만을 필요로 한다고 설정하였다.

### 3-2. 케이스의 data

앞의 두 가지 Case의 각 공급원과 수요처의 양과 순도를 Table 1에 정리하였다.

그리고 공급원과 수요처 사이의 거리 즉 공급원과 수요처를 연결했을 때 설치해야할 파이프라인의 길이 데이터는 Table 2와 같다.

Table 1. data of source and sink

	Flowrate (Nm <sup>3</sup> /hr)	Purity (%)
Source		
1	15,000	99.9999
2	10,000	99
3	30,000	75
4	15,000	75
5	8,000	75
Total	68,000	
Sink		
A	15,000	99.9999
B	15,000	95
C	10,000	99
D	15,000	99
Total	55,000	

Table 2. Distance between source and sink (km)

	Sink A	Sink B	Sink C	Sink D
Source 1	2	5	9	17
Source 2	1	2	6	14
Source 3	5	2	2	10
Source 4	13	10	6	2
Source 5	18	15	11	3

Table 3. Hydrogen selling price by purity

	Purity (%)	Price (won/Nm <sup>3</sup> )
1	99.9999	200
2	99	180
3	75	150
4	75	150
5	75	150
FRESH	99.9999	300
PSA1	99.9999	200
PSA2	99.9999	200
PSA3	99.9999	200
PSA4	99.9999	200
PSA5	99.9999	200

### 3-3. 수소가격계산

각 수소순도별 판매 가격은 순도가 높을수록 가격을 높게 설정하였고 외부에서 사오는 99.9999%의 수소(Fresh)의 가격은 단위당 300만원으로 설정하였다.

이를 Table 3에 정리하였고 FRESH는 네트워크 외부에서부터 사오는 수소를 의미한다.

수소 네트워크에 활용하는 수소의 원가를 계산하기 위해서 네트워크 구성이전에는 수소를 연료로 사용했다고 가정을 하고 수소의 발열량으로부터 수소의 연료가치(Fuel Value)를 구하였다. 일반적으로 많이 쓰이는 Bunker C oil의 가격과 발열량을 기준으로 하였다.

$$\text{Fuelvalue} = 2580/9790 \times 476 \times F \times C \quad (\text{Standard : bunkerC oil})$$

여기서 단위는 won/Nm<sup>3</sup>이다. 예를 들어 10000 Nm<sup>3</sup>/hr, 95%순도를 가진 수소의 연료가치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{2580}{9790} \times 476 \times 10000 \times \frac{95}{100} = 1191702 \text{ won}$$

### 3-4. 수리계획모델

#### 3-4-1. 목적함수(Object Function)

목적함수는 다음과 같은 Economic Potential을 최대화시키는 것이다.

Max EP =

$$\sum_{i,j}^n \sum_{j}^m C_i W_{ij} - \sum_{i,j}^n \sum_{j}^m C_{i,fuelvalue} W_{ij} - C_{fresh} \sum_j^m W_{fresh,j} - C_{pipe} - C_{PSA}$$

각 항이 의미하는 것은 다음과 같다.

$$\sum_{i,j}^n \sum_{j}^m C_i W_{ij} : \text{수소판매이익}$$

$$\sum_{i,j}^n \sum_{j}^m C_{i,fuelvalue} W_{ij} : \text{수소의 연료가치}$$

$$C_{fresh} \sum_j^m W_{fresh,j} : \text{네트워크 외부의 수소 구입비용}$$

$C_{pipe}$ : 파이프 비용

$C_{PSA}$ : 정제장치 비용

#### 3-4-2. 제약조건(Constraints)

이 최적화 모델에서는 다음과 같이 4가지의 제약조건이 필요하다

$$1) W_i = \sum_j^m W_{ij} + W_{i,fuel} + W_{ik}$$

$W_i$ : 공급원 i에서 공급 가능한 수소의 양

$\sum_j^m W_{ij}$ : 공급원 i에서 각 수요처들로 직접 공급되어지는 수소의 총량

$W_{i,fuel}$ : 공급원 i에서 연료로 사용되는 수소의 양

$W_{ik}$ : 공급원 i에서 정제장치인 PSA로 공급되는 양

첫 번째 제약조건은 공급원에서 공급해줄 수 있는 수소의 물질 수지이다.

$$2) G_j^{in} = \sum_j^m W_{ij} + W_{kj} + W_{fresh,j}$$

$G_j^{in}$ : 수요처 j에서 필요로 하는 수소의 양

$\sum_j^m W_{ij}$ : 수요처 j가 각 공급원들로부터 직접 공급받는 수소의 총량

$W_{kj}$ : 수요처 j가 정제장치인 PSA로부터 공급받는 수소의 양

$W_{fresh,j}$ : 수요처 j가 네트워크 외부에서부터 공급받는 수소의 양

두 번째 제약조건은 수요처에서 공급받는 수소의 물질 수지이다.

$$3) G_j^{in} Z_j^{in} \leq \sum_i^n W_{ij} Y_i + W_{kj} Y_k + W_{fresh,j} Y_{fresh}$$

$G_j^{in} Z_j^{in}$ : 수요처 j에서 필요로 하는 수소의 양과 순도의 곱

$\sum_i^n W_{ij} Y_i$ : 수요처 j가 각 공급원에서 직접 공급받는 수소의 양과 순도의 곱

$W_{kj} Y_k$ : 수요처 j가 PSA로부터 공급받는 수소의 양과 순도의 곱

$W_{fresh,j} Y_{fresh}$ : 네트워크 외부에서 공급받는 수소의 양과 순도의 곱

세 번째 제약조건은 수요처로 공급되어지는 수소의 농도가 수요처에서 필요로 하는 수소의 농도 이상이어야 한다는 농도 제약조건이다.

$$4) \sum_{j=1}^m W_{fresh,j} + \sum_{i=1}^n W_{ik} = Pinch$$

$\sum_{j=1}^m W_{fresh,j}$ : 네트워크 외부에서 사오는 수소의 양

$\sum_{i=1}^n W_{ik}$ : PSA에서 각 공급원들로부터 받아서 정제하는 수소의 양

4번째 제약조건은 네트워크 외부에서 사오는 수소의 양과 PSA에서 정제하는 수소의 양의 합이 수소 핀치의 양과 같다는 것이다. 핀치분석 통해 구한결과 case 1 같은 경우에는 30000 Nm<sup>3</sup>/hr, case 2 경우에는 40000 Nm<sup>3</sup>/hr를 핀치 제약조건으로 설정해주었다.

### 4. 결과분석

목적함수와 제약조건을 사용하여 MILP 문제를 구성하여 최적화 프로그램 중 하나인 What's best를 사용하여 풀었고 그 결과는 다음과 같다.

#### 4-1. Case 1의 결과

Case 1의 결과는 Table 4와 같다. 공급원 1과 공급원 2는 99%이상의 고순도의 수소이므로 PSA를 거치지 않고 곧바로 수요처 A와 수요처 D에 공급된다. 그리고 공급원 3, 공급원 4, 공급원 5는 모두 75%의 저순도의 수소이므로 PSA를 거쳐 고순도의 수소로 정제된 이후에 가까운 싱크들에 공급된다. 그리고 공급원 3과 공급원 4가 좀 멀리 떨어진 위치의 수요처 D에 공급을 한다면 추가의 파이프라인을 설치할 필요 없이 기존에 연결되어있는 공급원 2와 수요처 D사이의 파이프라인을 활용하여 일부의 수소를 공급해주었다. 이해를 돕기 위해서 이 결과를 그림으로 도시하면 Fig. 6과 같다.

Table 4 Result flow rate set of Case 1

	A (99.9999%)	B (95%)	C (95%)	D (99%)	FUEL	Total
1 (99.9999%)	15000	0	0	0	0	15000
2 (99%)	0	0	0	10000	0	10000
3 (75%)	0	0	0	0	0	30000
4 (75%)	0	0	0	0	0	15000
5 (75%)	0	0	0	0	0	8000
FRESH	0	0	0	250		
PSA1	0	0	0	0		
PSA2	0	0	0	0		
PSA3	0	20000	0	10000		
PSA4	0	0	13333	1667		
PSA5	0	0	0	8000		
Total	15000	20000	13333	29917		

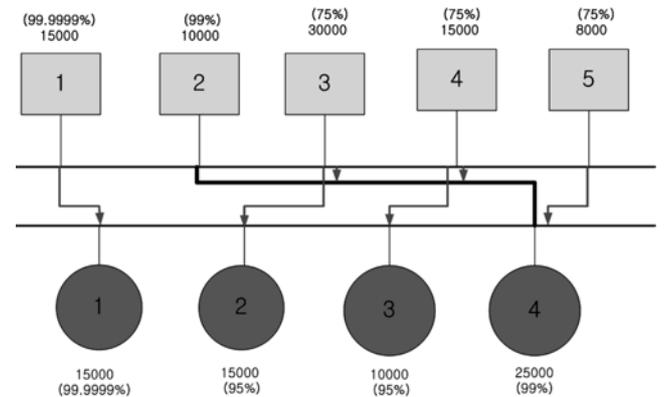


Fig. 6. Optimization result of case 1.

Table 5. Result flow rate set of Case 2

	A (99.9999%)	B (95%)	C (95%)	D (99%)	FUEL	Total
1 (99.9999%)	15000	0	0	0	0	15000
3 (75%)	0	0	0	0	0	30000
4 (75%)	0	0	0	0	0	15000
5 (75%)	0	0	0	0	0	8000
FRESH	0	0	0	250		
PSA1	0	0	0	0		
PSA2	0	0	0	0		
PSA3	0	20000	10000	0		
PSA4	0	0	3333	11667		
PSA5	0	0	0	8000		
Total	15000	20000	13333	19917		

#### 4-2. Case 2의 결과

Case 2의 결과는 Table 5에 정리하였다. 공급원 2와 수요처 D사이의 공급과 파이프라인을 제외하고 네트워크를 구성한 것으로 위와 같이 결과가 나왔다. 경우 1에서는 공급원 3과 공급원 4의 기존 파이프라인을 활용해서 멀리 떨어져있는 수요처 D에 공급을 해주었는데 Case 2에서는 공급원 3과 공급원 4 모두 가까운 곳에 위치한 수요처들에 수소를 공급해주었다. 위의 결과를 그림으로 도시해보면 Fig. 7과 같다.

Case 1과 case 2의 이익과 비용을 Table 6에 정리하였다.

정리 결과를 분석해보면 공급원과 수요처의 수소 공급, 필요량이 두 개의 Case가 일치하므로 수소판매 이익, 연료대체 비용, PSA 비용은 동일한 결과가 나왔고 파이프 비용에서만 기존의 파이프라인

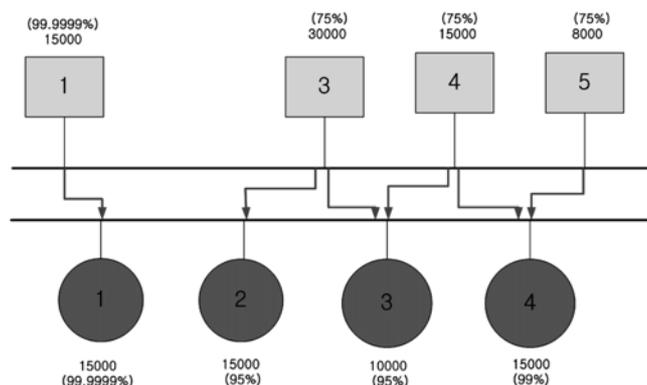


Fig. 7. Optimization result of case 2.

Table 6. Comparison between case 1 and case 2

	Case 1	Case 2
H <sub>2</sub> selling profit	95,921,994,654 won	95,921,994,654 won
H <sub>2</sub> fuel value	60,163,359,288 won	60,163,359,288 won
pipe cost	4,677,950,846 won	6,061,091,144 won
PSA cost	3,352,880,546 won	3,352,880,546 won
Total network profit	27,727,803,973 won	26,344,663,675 won

Table 7. Cost saving

	Won	Saving rate
Pipe cost saving	1,383,140,298 won	22.82 (%)
Total network profit increment	1,383,140,298 won	5.25 (%)

을 이용한 case 1이 약 138억 가량을 적게 나왔다.

이를 비율로 계산해보면 Table 7에서 볼 수 있듯이 case 1의 경우가 파이프 비용이 약 22.82% 더 적게 나오고 전체 네트워크 이익은 5.25% 향상되고 약 138억이라는 상당히 큰 기대효과를 얻을 수 있다는 결과가 나왔다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 석유화학산업단지 내 수소네트워크 구축 시 기존의 파이프라인 활용에 따른 경제적 효과를 case 비교를 통해 계산해보았다.

이로부터 기존의 파이프라인을 활용함으로써 가상으로 구성한 case의 경우에 20%이상의 파이프 비용을 줄일 수 있고 상당한 경제적 이익을 얻을 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다. 기존의 파이프라인을 활용하는 것이 더 높은 이익을 얻을 수 있다는 것이 당연한 결

과이긴 하지만 이를 수학적 모델과 계산으로 주어진 조건과 스케일 하에서 수치적으로 명확하게 보여줬다는 것에 이 연구의 의의가 있다. 이와 같은 결과가 실제 산업현장과 기업의 의사결정에 직접적으로 도움을 줄 수 있길 바란다. 그리고 앞으로 현재의 모델을 조금 더 발전시켜 컴프레셔와 같은 기타 장치비용을 추가하고 파이프라인 이외의 여러 설비를 공유하는 모델을 만든다면 좀 더 실용적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 감 사

본 연구를 위해 지원을 해주신 산업자원부 국가청정생산지원센터(KNCP)와 서울대학교 화공분야 연구인력양성 사업단(BK21), 한국과학기술연구원(KIST), 에너지관리공단(에너지 자원기술개발 사업), 한국과학재단(특정기초연구, R01-2004-000-10345-0), 한국과학재단 지정 포항공과대학교 차세대 바이오 환경기술연구센터(AEBRC, R11-2003-006)에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Hallale, N. and Liu, F., Refinery Hydrogen Management for Clean Fuels Production, *Adv. Enc. Res.*, **6**, 81-98(2001).
- Liu, F. and Zhang, F., "Strategy of Purifier Selection and Integration in Hydrogen Networks," *Chem. Eng. Res. Des.*, **82**(20), 1315-1330(2004).
- Changhyun Jeong, "Optimal Hydrogen Recycling Network Design of Petrochemical Complex," *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(1), 25-31(2007).
- Linhoff, B., "Pinch Analysis: A State-of-the-Art Overview," *Chem. Eng. Res. Des.*, **71**, 503-522(1993).
- Alves, J. J. and Towler, G. P., "Analysis of Refinery Hydrogen Distribution Systems," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**(23), 5759-5769 (2002).
- Parker, N., Using Natural Gas Transmission Pipeline Costs to Estimate Hydrogen Pipeline Costs, Oil & Gas Journal's annual Pipeline Economics Report(1991-2003).
- Hallale, N. and Liu, F., Refinery Hydrogen Management for Clean Fuels Production, *Adv. Enc. Res.*, **6**, 81-98(2001).
- Towler, G. P., Mann, R., Serriere, A. J-L. and Gabaude, C. M. D., "Refinery Hydrogen Management: Cost Analysis of Chemically-Integrated Facilities," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**(7), 2378-2388 (1996).